

特殊地质条件下高铁地基的处理策略

徐杰

(中铁十五局集团第五工程有限公司, 天津 300000)

【摘要】随着我国高速铁路网络的迅速扩展,特殊地质条件下的地基处理成为确保铁路安全、稳定运行的关键技术之一。特殊地质条件包括但不限于湿陷性黄土、多年冻土、软土地基、岩溶地基等,这些地质条件对高速铁路的地基设计和施工提出了更高的要求。因此,制定科学合理的地基处理策略至关重要。本文将探讨在特殊地质条件下如何有效处理高铁地基的方法和策略,以确保高铁线路的安全运行。

【关键词】特殊地质条件; 高铁地基; 处理策略

引言:

特殊地质条件下的高铁地基处理需要综合考虑地质特征、工程技术和经济效益等多方面因素。针对不同地质条件,可以采用加固处理、排水降渗、地基改良等方法,以提高地基的承载能力和稳定性。同时,还需注重环境保护和可持续发展,确保地基处理过程符合相关法规标准。通过科学合理的地基处理策略,可以有效应对特殊地质条件下的高铁建设挑战,保障高铁线路的安全和可靠性。

一、特殊地质条件对高铁地基的影响分析

(一) 高原高寒冻土地区

首先,由于多年冻土与季节冻土的共同作用,引起了路基的不稳定等问题。青藏线格尔木-拉萨段存在“多年冻土、寒区低氧、生态脆弱”三个世界性难题,而多年冻土区路基稳定是其核心和关键。其次,冻胀变形会对高速铁路路基的安全性产生不利影响,特别是当冬季冻土区土壤冻结时,更是加大了工程设计的难度。为保障季冻区高铁的安全运行,迫切需要开展冻融与列车荷载共同作用下的路基稳定与发展规律研究。再次,在全球气候变暖的背景下,多年冻土出现了明显的劣化现象,主要体现在多年冻土温度升高、埋深增加以及冻土层下的溶解等方面,这些都会对寒区工程建设的稳定性、气候以及水文-生态过程产生重要影响。最后,在高寒地区,高铁运营对行车舒适性的要求非常高,其特有的气候特点使得冻胀损伤问题更加严重。

(二) 沿海软土地区

滨海软土地上,临近高速铁路路基附近的深基坑工程,会引发周围土的变形,从而使路基变形超出规范标准,给高速铁路的安全运行带来严重的安全隐患。尤其在我国的东南沿海,软土分布广泛,高铁线路密集,深基坑工程对临近高铁路基的影响尤其突出。软土地区高铁路基的工后沉降一直是一个热门课题。深基坑开挖后产生的长期的、具有较强的徐变特征,

各土层在开挖后的沉降量呈现出明显的先增大后减小的趋势,并最终产生较大的沉降。同时,深基坑工程极易引发周围地面不可控制的沉陷,进而造成既有线路轨道偏移,进而影响既有线路的安全运行。我国东南沿海地区正处于高速发展阶段,大量修建了大量的地铁线路,由此引发的振动与沉降问题也随之凸显。已有研究发现,高铁振动对既有线路基的影响不大,而对路基土的动力位移、动力位移等均无明显影响。海相软黏土因其高压收缩、低强度和高含水量等特点,极易发生桩基倾斜、基坑失稳和基础承载破坏等工程安全问题。因此,在滨海软土地区开展高速铁路施工将会更加困难。粉喷桩、浆喷桩、真空联合堆载预压等是目前软基处理技术发展的热点。这些方法能够有效控制软土地基的差异沉降,保证高铁建设的安全性和稳定性。

(三) 红层泥岩地区

红层泥岩持水性强、亲水性好,吸水后容易发生膨胀,结构面剪切强度显著降低,失水后会收缩、崩解等工程特征。这一特点使其遇水后会引发高铁无碴轨道路基上拱,从而对高铁的稳定与安全产生不利影响。红层泥岩的微膨胀也是制约中国高铁建设的主要原因之一,因此,合理评价泥质页岩的微膨胀率,对于高铁建设有着十分重要的意义。另外,红层泥岩在饱水条件下的累积变形特征尚不清楚,这对高铁路基填料的适应性提出了新的挑战。已有的红层泥岩蠕变特征及本构关系研究发现,饱水-失水循环作用下的泥质页岩具有明显的蠕变特征,为软岩基长期稳定研究奠定基础。最后,红层泥岩的力学特性和能量演化规律的研究也显示了围压效应对红层泥岩力学特性、总应变能密度、弹性应变能的影响。

(四) 黄土地区湿陷性问题

在湿陷性黄土地区,如何对其进行有效的变形控制是高速铁路施工中的一重要技术难点。湿陷性黄土遇水后会产生体积收缩而引起的路基沉陷,严重影响

响高铁的正常运行。郑西客运专线是我国首条跨越湿陷性黄土地带的高铁，其路基沉降控制对保障行车安全具有十分重要的意义。为解决湿陷性黄土问题，国内外学者对其进行了大量的试验研究，主要有锤击桩、挤密桩、强夯等。以上几种处理方法均有不同的应用范围和局限性。比如，采用柱锤法和挤密法加固的地基，经一段时间的堆载预压可达到高速铁路对路基的沉降控制，但经长期堆载预压后，仍不能达到预期的效果。长期淹水作用下，湿陷性黄土地区高速铁路路基的沉降变形将更为复杂。已有研究发现，沉桩挤密桩基础在浸泡一段时间后会产生产附加沉降，而且长期持续浸泡后，桩—锤复合地基的沉降量比挤密桩路基的沉降要小。这表明，在施工过程中，应注意压密桩桩身的防渗处理，防止出现局部积水，确保行车安全。处理后的湿陷性黄土地基是一种典型的非饱和土。相对于饱和土体，非饱和土体的工程性质更加复杂，其理论体系还不够完善，在实际工程中存在较大的局限性。因此，对于处理后的湿陷性黄土地基非饱和土，建立合理的固结理论和适用可靠的计算方法非常重要。在湿陷性黄土地区，除产生直接的沉陷问题，高速铁路路基还存在着潜在的腐蚀隐患。在湿陷性黄土地区，潜蚀是一种特殊的冲刷形式，严重影响了铁路施工的安全。

二、特殊地质条件下高铁地基的具体处理策略

（一）强夯、水泥土挤密桩

强夯法也叫动力固结法，是一种通过巨锤从高处自由下落对地基施加巨大的冲击能及冲击波的方法。该技术可在土体中引入较大的冲击应力，使土体内部孔隙受到压缩，部分液化，并在夯击点附近形成裂隙，为孔、气等物质提供了良好的排水通道，使土中的水、气得以释放，并通过时间的压实实现固结，进而提高地基的承载力，减小地基的压缩性。强夯法除适用于未饱和土、饱和土等地基处理外，还可用于填土、冲积土等多种类型的软基处理。在深厚差异大、含砾石较多的特殊土壤及环境条件下，或在粉煤灰回填层上开排水沟，再进行低能强夯，可显著改善地基强度，降低差异沉降。水泥土挤密桩技术则是通过将复合材料（土加水泥）夯入路基内，提高基床承载力，并在夯入复合材料过程中对桩周围原有填土进行横向挤密，从而达到提高路基承载力的作用，具体流程见图1。该工艺可有效改善土体的压缩模量、挤密度及渗透性，并改善其压缩度及无侧限抗压强度。水泥土挤密桩是一种以桩—土的横向挤密和桩的置换效应为基础的复合桩，在沉桩过程中，由于桩周土体产生强烈的水平挤压力，使得周边土体变得更加致密；再将搅拌好的水泥砂浆层层压入桩孔中，再用夯锤将其压实，使其达到一定的强度，从而对桩间土进行再一次挤密。

在工程实践中，应结合工程地质条件、工程要求及施工条件等因素，选用强夯法或水泥粉喷桩等方法。其中，粉喷桩作为一种新型的软土地基处理方法，由于具有较好的单桩承载力和较好的物理力学性能，得到了越来越多的应用。对于既要进行快速补强，又不会影响施工进度施工，强夯法是一种较好的施工方法。同时，将两者进行合理的组合，可以更好地改善地基处理效果，并取得较好的经济效益。

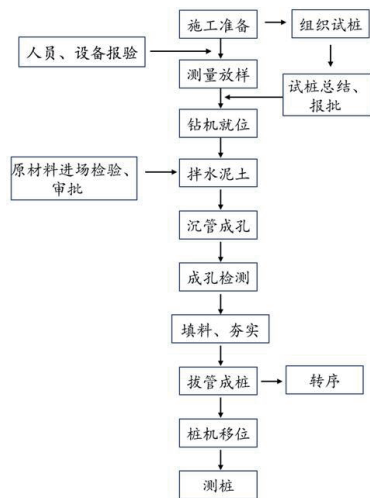


图1 水泥土挤密桩施工流程图

（二）柱锤冲扩桩、长短桩复合地基

柱锤冲扩桩技术是一种适用于湿陷性黄土地区的桩基工程，其作用机制包括：冲扩荷载、冲扩侧向挤密、孔内压密、填料冲扩的二次挤密作用和桩基填料的物化作用等。尤其在对湿陷性黄土进行治理时，可减少空隙率，消除湿陷。例如，在大西铁路客运专线站场工点采用柱锤冲扩桩和CFG桩复合地基进行处理，通过工艺性试验确定了施工工艺参数，成功实施了110万米该桩的施工，达到了消除黄土湿陷性和提高复合地基承载力的目的。此外，水泥土柱锤冲扩桩复合地基技术也在郑西客运专线深厚湿陷性黄土地基上得到应用，通过理论分析、数值仿真分析、现场长期工程试验等方法系统地开展了相关研究，验证了其在控制路基工后沉降的有效性。而长短桩组合地基处理方法，能有效地解决浅层黄土的湿陷性，提高地基的承载能力，控制路基的整体沉降及差异沉降。通过室内模型试验，桩长比和桩间距对沉降的影响较大，桩长比越大、桩间距越小，复合地基沉降越小，其对黄土地基的加固效果越明显。如在某高铁穿越湿陷性黄土地区，利用长短桩对黄土地基进行加固，经合理的施工方案及瑞雷波波速加载板法检测，能够取得良好的效果。在工程实践中，可根据具体的地质情况及工程要求，选用并结合两种方法。如在湿陷性黄土地区建设高铁，可将CFG桩+水泥土挤密桩组成的长短桩组合地基，对其进行软基处理，使其承载力

与变形性能得到显著提高。

(三) 桩板结构

首先, 桩板结构的设计计算是确保其有效性的基础。在深厚软土地层中, 传统的散体桩和水泥搅拌桩无法满足高速铁路地基沉降控制的需求, 而 CFG 桩帽网结构和桩板结构则显示出较好的效果, 其中桩板结构的工后沉降量仅为 11 mm, 远低于控制值 15 mm。此外, 深埋式桩板结构的设计参数通过二维和三维的有限元模型计算得出, 表明二维与三维框架法计算结果接近, 且均满足无砟轨道的控制指标要求。这说明在设计阶段, 采用合理的计算方法对于确保桩板结构的有效性至关重要。其次, 施工工序也是桩板结构技术做法中的一个重要环节。例如, 在灰岩地区, 桩板结构路基的工作机理和施工工序需要根据地质特点进行相应的调整。而在沿海地区复杂地质条件下, 桩基础施工的技术运用错误和设计未能结合实际情况等问题, 对高铁桥梁整体的安全性和稳定性产生了不利影响。这表明施工过程中需要针对具体的地质条件和工程特点, 采取相应的技术和管理措施。再者, 材料选择对于桩板结构的性能有着直接影响。如在深软土层中加铺碎石垫层, 可有效地控制高铁路基的工后沉降。对于喀斯特地区, 常规的桩基-板桩组合加固方法, 其加固效果不能得到保障, 造价也很高, 而高桩基础的研究为该问题的解决提供了理论依据。为了保证桩-板结构的长期稳定, 还需要对其进行后期的监测。又比如在采空区采用桩-板结构时, 通过原位变形试验, 获得采空区地基、桩基等结构物的变形特征及变化规律, 从而保证工程安全。

(四) 新桩型技术应用

1. 布袋注浆桩。布袋注浆桩是一种对软弱土层深厚软弱土层进行加固的新技术。该技术是将水泥浆灌注于软弱土层中, 形成一个加固体, 从而达到增强地基承载力与稳定的目的。在高铁路基施工过程中, 布袋灌浆可以很好地控制路基的工后沉降。另外, 通过对袋式注浆桩的施工工艺进行改造, 如采用振动沉桩等, 可进一步降低工程造价, 提高工作效率。

2. 现浇 X 形桩。现浇 X 形桩是利用其增大接触面, 使承载力分布更加均匀的特点而提出。与常规单桩比较, X 形桩具有较高的抗压承载力, 且具有良好的横向承载性能。同时, 对高强桩组合地基的研究也显示, 在充分考虑桩-土相互作用、荷载分配、沉降计算和稳定性分析等方面具有重要意义。就 X 形桩的施工技术而言, 主要分为基础开挖、钢筋笼制作和安装、混凝土浇筑四个阶段。该工艺要求对混凝土配合比、浇注速率等进行严格的控制, 从而保证桩身质量及承载能力。尤其是对于软弱地基, 采用现浇 X 形桩作为一种新型的加固方法, 既可有效地控制基础沉降, 又可减轻对周边环境的影响, 确保其安全、经济。就 X

形桩的施工技术来说, 主要分为基础开挖、钢筋笼制作和安装、混凝土浇筑四个阶段。该工艺要求对混凝土配合比、浇注速率等进行严格的控制, 从而保证桩身质量及承载能力。尤其是对于软弱地基, 采用现浇 X 形桩作为一种新型的加固方法, 既可有效地控制基础沉降, 又可减轻对周边环境的影响, 确保其安全、经济。

3. 碎石注浆桩。碎石注浆桩通过在碎石桩内部注入水泥浆或其他胶结材料, 形成具有一定强度和刚度的复合地基, 从而提高地基的承载力和稳定性。该技术的优势在于其能够有效解决高速铁路下穿既有桥梁地段深层软基加固的难题, 如沪宁城际铁路路基设计中的应用就取得了成功。另外, 它具有施工方便, 设备移动灵活等优点, 尤其适合于临近已有建筑物, 施工场地有限的情况下。在材料优化上, 采用掺膨胀剂的方法, 使其具有良好的力学特性, 能够有效地弥补桩体的变形和自收缩; 高的水胶比能够有效地降低过多的膨胀剂对桩基的力学性能带来的负面影响。此外, 通过模型试验和数值模拟研究表明, 膨胀浆固碎石桩的竖向承载性能更优, 桩侧摩阻力更大, 在达到极限荷载时较普通浆固碎石桩提高了约 39%。在复杂施工环境下的应用研究中, 碎石注浆桩复合地基技术显示出良好的沉降控制能力, 满足无砟轨道要求。这表明该技术不仅适用于常规的软基处理, 也能够应对高压电线、高架桥等复杂施工环境下的地基加固需求。

三、结语

综上所述, 在特殊的地质环境下进行高速铁路路基处理是高速铁路建设的重点和难点。从目前已有的研究成果来看, 目前已有一套适合于各种地质情况的处理方法与技术。本项目的研究成果将为今后同类工程建设积累可资借鉴的经验与技术支撑。但是面临着复杂的地质条件与技术难题, 需要对其进行深入研究, 以进一步提升其加固效果, 保证高铁的安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 张振海. 高铁路基工程软弱地基 CFG 桩加固施工技术研究 [J]. 运输经理世界, 2024, (03): 154-156.
- [2] 余国平. 软弱地质高填方加宽路基地基沉降处理方案探讨 [J]. 北方交通, 2023, (04): 39-43.
- [3] 刘志宏. 盾构下穿在建高铁桩板复合地基变形规律及施工参数优化研究 [D]. 导师: 滕旭秋; 文华. 兰州交通大学, 2023.
- [4] 苑东亮, 贺琳, 黄铭, 任连伟. 基于模糊 DEMATEL-ISM 的高铁采空区地基注浆治理影响因素研究 [J]. 金属矿山, 2023, (01): 172-180.